第41卷 第8期
2024年8月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 8
Aug. 2024

三江源区不同覆被类型高寒草甸土壤水分变化特征

万佳怡[1]， 矢佳昱[1,2]， 张华敏[3]， 李兰晖[4]， 丁明军[1,2]

（1. 江西师范大学地理与环境学院，江西 南昌 330022；2. 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室，江西 南昌 330022；3. 江西省自然资源政策调查评估中心，江西 南昌 330025；4. 厦门理工学院计算机与信息工程学院，福建 厦门 361024）

摘 要：土壤水分是植物生长与繁殖的物质基础，明确其动态特征对当地水资源管理和植被恢复具有重要意义。本文以三江源区高寒草甸为研究对象，结合野外调查与室内实验，分析不同覆被类型下高寒草甸土壤水分年、季、日动态特征，探讨植被及土壤因素对土壤水分变化的影响。结果表明：（1）2022年降雨偏少、气温偏高，各样地土壤液态水含量下降了1%~18%；夏秋季土壤未冻水含量高于冬春季，各样地各土层中月平均含水量最高为10月（0.495 $m^3\cdot m^{-3}$），最低为1月（0.038 $m^3\cdot m^{-3}$）；3月和12月土壤液态水含量日变幅较大，变化范围分别为0.11~0.20 $m^3\cdot m^{-3}$和0.07~0.16 $m^3\cdot m^{-3}$；（2）轻中度退化高寒草甸（YG4）和原生高寒草甸（YG5）植被覆盖度较高、容重较低，土壤含水量较高且变化幅度小；（3）人工草地耗水量大且物种单一、土壤肥力较低，不利于土壤保水。研究结果可为三江源区高寒草甸生态系统的恢复与治理提供参考。

关键词：植被盖度；土壤含水量；退化；人工草地；三江源区

土壤水分是连接地下水与地表水的关键纽带，是陆地生态系统的重要组成部分[1]。土壤水分广泛参与水热交换，可直接影响水资源的形成、消耗与转化，亦可通过调节土壤微环境而作用于植被生长[2]。因此，土壤水分是影响土壤-植物-大气连续体的关键因子，在物质循环和能量交换中起着重要作用[3-4]。然而，土壤水分特征具有一定的异质性，气象因素、土壤特征、植被状况、人为活动等均可能影响其含量与分布[5]。准确掌握土壤水分状况，充分认识其动态变化，有利于更好地实施土壤保水措施，促进水资源的可持续利用。

青藏高原拥有世界上最大的高寒草地生态系统，其中高寒草甸广泛分布于青藏高原东部及其周围山地[6-7]，约占青藏高原草地面积的47.05%[8]。三江源位于青藏高原腹地，特殊的下垫面和大气过程使其成为全球环境变化的敏感区和脆弱带[9]。自20世纪90年代开始，受全球气候变化及人类活动加剧等诸多因素的综合影响，三江源区高寒草甸发生了不同程度的退化[10]，形成了不同的覆被类型。土地利用/植被是导致土壤水分异质性的重要因素[11-12]，其通过保水和耗水两种生态功能对土壤水分产生不同程度的影响，控制着土壤水分的分布格局[13]。例如，鼠害活动引起的草甸退化使草毡层干化、土质疏松，土壤持水能力降低[14]；人工草地建植有助于形成茂密的草被层和根系层，利于土壤贮水[15]；但亦有研究表明，人工草地的生长旺盛期可能会加剧水分消耗，甚至形成土壤干层[16]。由此可见，土地利用/植被对土壤水分的调节作用受植被类型、管理方式、区域环境等多因素的调节，其结果仍存在较大不确定性。因此，开展三江源区不同覆被类型高寒草甸的土壤水分监测，对当地水资源管理与植被恢复具有十分重要的意义。

目前，多利用遥感影像对高原表层土壤湿度进行反演，以获取大尺度土壤水分的空间分布特征[17-19]。然而该方法需在合适的时期和频率上采集数据，且存在一定误差。相比之下，定点观测具有直接、实时、精度高的优势，能够长期、连续监测土壤水分变化，也是上述大尺度表层土壤水分遥感反

收稿日期：2024-01-17； **修订日期**：2024-04-03
基金项目：国家自然科学基金（42101099）；第二次青藏高原综合科学考察研究项目（2019QZKK0603）
作者简介：万佳怡（2000-），女，硕士研究生，主要从事土地利用/覆被变化研究. E-mail：202240100063@jxnu.edu.cn
通讯作者：矢佳昱. E-mail：jyshi1205@163.com

演校正的数据基础[20]。因此,定点观测是土壤水分时间动态监测的重要手段。根据数据来源,该方法可划分为利用已有数据研究[21]和实验采集数据研究[22-23]两类。相比于已有数据研究,实验采集数据可以更好地控制变量,确保其对研究结果的影响最小化,提高结果的可靠性、准确性以及时效性。然而,由于三江源地区观测站点较少,缺乏长时间尺度的土壤水分监测,致使不同覆被类型高寒草甸的土壤水分动态特征并不明晰,其影响因素尚不明确。

因此,本文以三江源区不同覆被类型高寒草甸为研究对象,基于野外调查与室内分析,采用HOBO土壤温湿度记录仪对土壤液态水含量进行了3 a的地面站点观测,分析土壤水分的年、季、日动态特征,探讨植被及土壤因素对土壤水分变化的影响,以期为三江源区高寒草甸生态系统的恢复与治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区玛沁县(33°43′~35°16′N,98°~100°56′E)地处青海省东南部(图1),果洛藏族自治州东北部,系国家级"三江源"生态保护区的核心腹地,也是青藏高原草地生态系统的关键组成部分。研究区属典型的高原山地类型,平均海拔4100 m以上,境内西北部和北部高山环绕,河流众多,属黄河水系。玛沁县年均气温-3.8~3.5 ℃,气温低,日温差大。降水在日控分布上不均匀,各河流的天然径流量以降水补给为主。年降水量423~565 mm,降雨多集中于6—9月。全县辖区总面积13460.12 km^2,其中草场面积11757 km^2,可利用草场面积10853 km^2,占草场面积的92.3%。草地资源共有高寒草甸类、高寒草原类、山地草甸类、温性草原类四类,其中以高寒草甸类为主,优势种为高山嵩草(*Carex parvula*),土壤以高山草甸土和高山灌丛草甸土为主。

研究区2019—2022年气温及降水情况如图2所示,相比于往年,2022年气温整体偏高,其中8月平均气温最高,达11.56 ℃。2022年降水量则低于往年,与前3 a相比,分别下降了17.6%、18.1%、30.2%。数据来源于NASA GISS: NASA Goddard Institute for Space Studies (https://www.giss.nasa.gov)。

1.2 样地设置

在玛沁县境内选取了5个典型样地,分别为人工草地(YG1)、新翻种人工草地(YG2)、黑土滩(YG3)、轻中度退化草地(YG4)[24]和原生高寒草甸(YG5)。人工草地种植的是垂穗披碱草(*Elymus nu-*

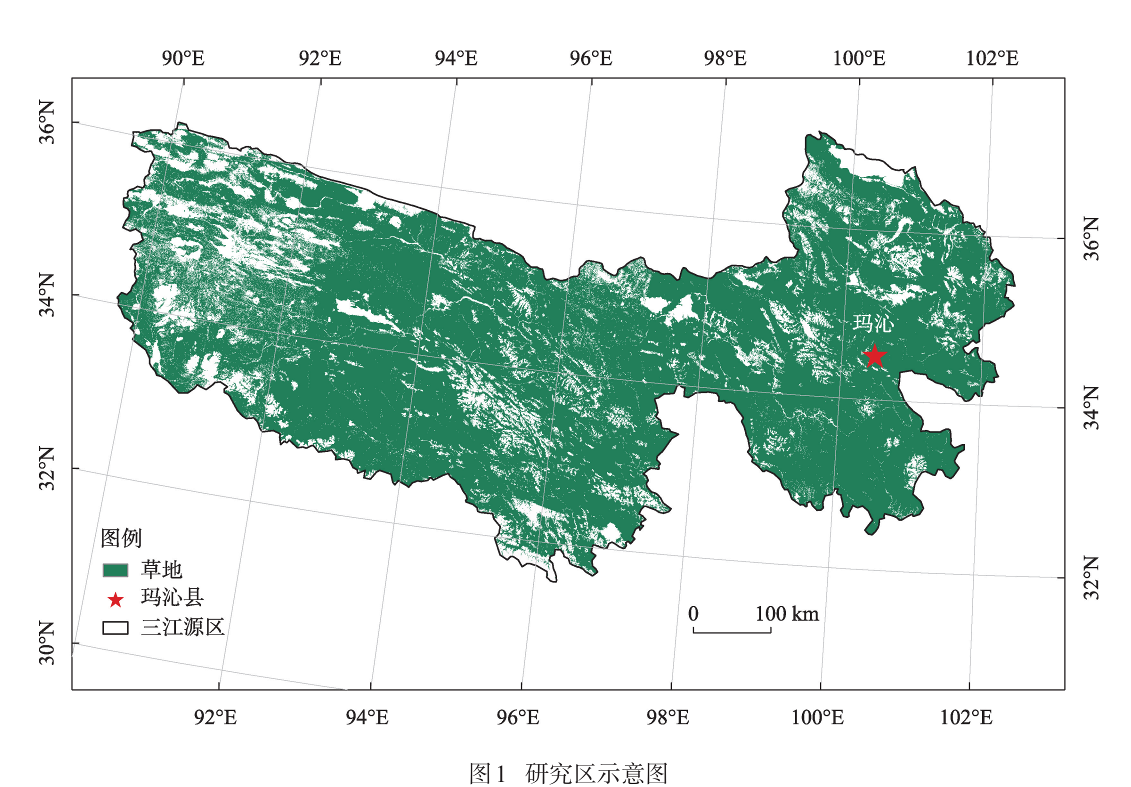


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

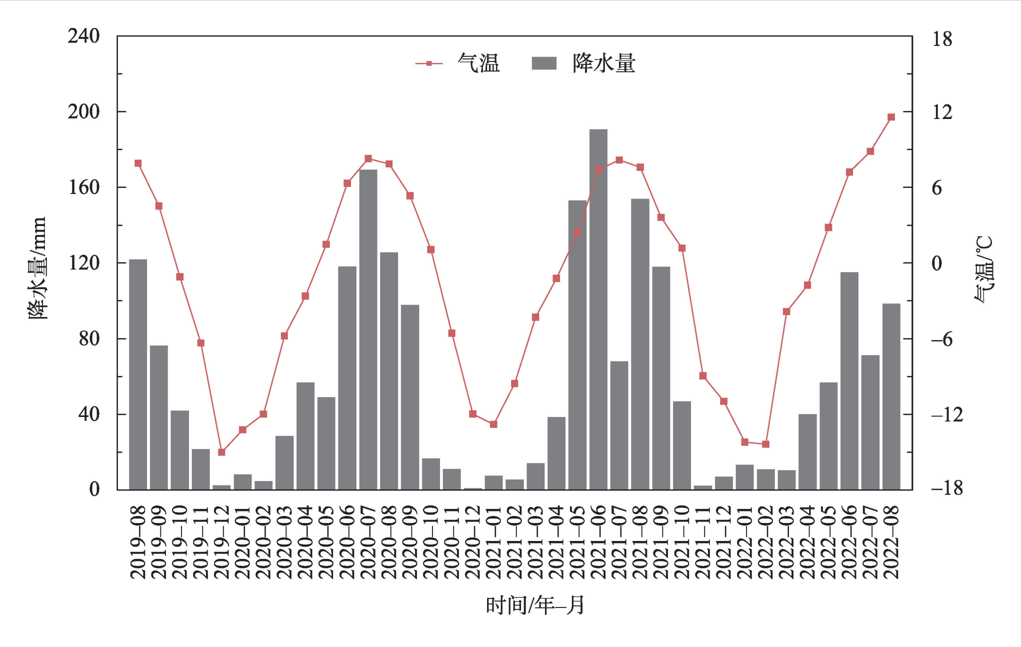


图2　研究区2019—2022年月平均气温和降水量

Fig. 2　Mean monthly air temperature and monthly precipitation from 2019 to 2022

tans)，它是高寒地区退化草地修复和人工草地建植的主要草种[25]。新翻种人工草地是指将裸地重新翻耕播种。黑土滩是高原高寒草甸因退化而形成的"秃斑"状裸露土地，严重威胁三江源草地生态安全和畜牧业发展，研究区中的黑土滩未采用恢复措施。样地基本信息如表1所示。

1.3　土壤含水量测定

于2019—2022年，运用HOBO土壤温湿度记录仪(S-SMC-M005, Onset, 美国)测定土壤液态水含量，仪器工作温度范围为-25~60 ℃，可确保冬季正常工作。将探针分别水平插入5 cm、15 cm、30 cm三个土层，数据采集时间间隔为1 h。监测数据为土壤液态水的体积含水量，土壤未冻结时期所测得的含水量为土壤总含水量，土壤冻结时期所测得的含水量仅为土壤未冻水含量，本文土壤含水量指的是未冻水的含量，而不包括冻结冰的固体含水量。由于部分仪器损坏，YG1和YG2样地0~5 cm土层深度的土壤含水量数据有所缺失。

1.4　植物群落调查

于2019—2021年每年7月或8月进行群落调查，每个样地随机选取27个样方，样方面积为50 cm×50 cm，分别记录样方内植物物种名、盖度、多度等指标，并将其划分为禾本科、莎草科和杂类草三种功能群类型[26]。采用收获法获取植物地上生物量。

1.5　土壤理化性质测定

进行完群落调查后在每个样方内用土钻采集表层(0~10 cm)土壤样品并装袋，运回实验室，经风干去杂、磨细过筛后进行理化性质分析。使用烘干法测定土壤质量含水量，使用环刀法测定土壤容重。根据土壤质量含水量与相应的容重计算出土壤体积含水量，以进一步验证土壤温湿度记录仪监测数据的准确性。使用pH计测定1:2.5土水比下的pH值，使用重铬酸钾容量法测定土壤有机质，使用NaOH熔融–火焰光度法测定土壤全钾，使用半微量

表1　样地基本信息

Tab. 1　Basic information of sample sites

样地编号	覆被类型	经度(E)	纬度(N)	海拔/m
YG1	人工草地	100°29′44″	34°21′25″	3955
YG2	新翻种人工草地，未见幼苗	100°29′39″	34°21′27″	3953
YG3	黑土滩	100°29′43″	34°21′20″	3950
YG4	轻中度退化草甸	100°29′15″	34°21′22″	3945
YG5	原生高寒草甸	100°29′12″	34°21′24″	3944

凯氏定氮法测定土壤全氮，使用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定土壤全磷[27]。使用激光粒度仪(HORIBA，LA-950，日本)测定土壤颗粒组成[28]，并按照美国农部制粒径分级标准将土壤分为黏粒、粉粒和砂粒。

1.6 数据分析与统计方法

使用IBM SPSS Statistics 22软件进行数据分析与统计，在置信水平为95%的条件下用单因素方差分析(Oneway-ANOVA)和Turkey多重比较来分析不同覆被类型高寒草甸土壤水分之间的差异，使用Pearson相关分析研究土壤水分与植被和土壤因子之间的相关性。所有数据可视化均采用Origin 2023软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同覆被高寒草甸土壤水分年际变化

不同覆被类型高寒草甸土壤液态水含量的年际变化趋势具有一定相似性，呈波动变化。2021年8月至2022年8月，不同覆被类型土壤含水量较前2 a均有所下降，各土层下降了1%~18%(图3、图4)。YG4和YG5的土壤含水量高于其他样地，且滞后现象明显，波动幅度较小。其中YG4在三个土层的土壤含水量均显著高于其他样地，分别为0.064~0.552 $m^3 \cdot m^{-3}$(0~5 cm)、0.080~0.467 $m^3 \cdot m^{-3}$(5~15 cm)和0.080~0.499 $m^3 \cdot m^{-3}$(15~30 cm)。三个土层中，YG4和YG5在0~5 cm的土壤含水量最高，而YG1、

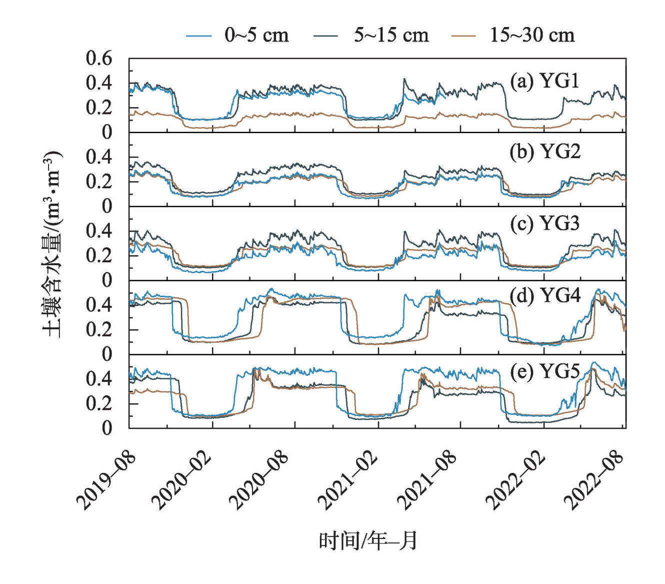
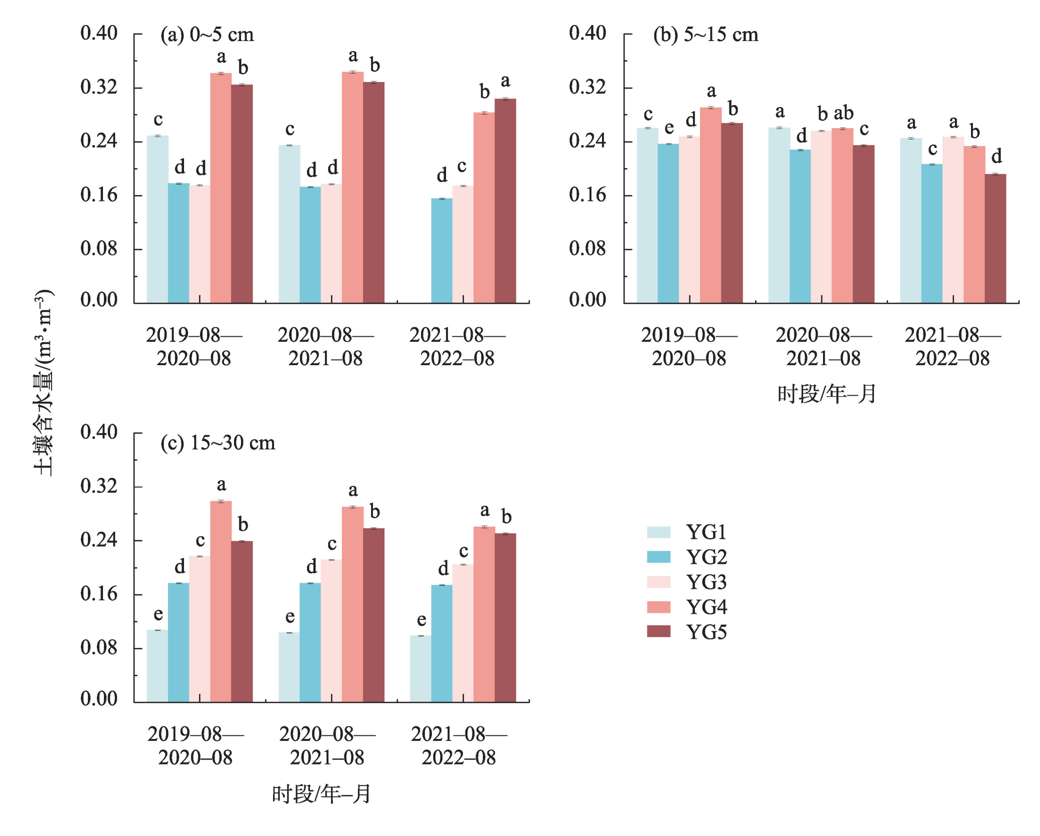


图3 不同覆被类型土壤含水量动态变化

Fig. 3 Dynamics of soil water content in different cover types



注：不同小写字母表示同一时间内不同覆被类型土壤含水量差异显著(P<0.05)。

图4 不同覆被类型土壤含水量年际变化(平均值±标准误)

Fig. 4 Interannual variation in soil water content for different cover types (mean ± SE)

YG2和YG3在5~15 cm的土壤含水量均高于其他两个土层。

2.2 不同覆被高寒草甸土壤水分季节变化

从年内尺度看（图3），各覆被类型高寒草甸不同土层土壤液态水含量均存在明显的季节变化，总体呈“几”字型曲线。夏秋季（5—11月）土壤含水量较高，月平均最高值集中于6月或10月（0.146~0.495 $m^3·m^{-3}$）。冬春季（12月至次年4月）土壤含水量较低，月平均最低值集中于1月或2月（0.038~0.121 $m^3·m^{-3}$）。

2.3 不同覆被高寒草甸土壤水分典型日变化

选取一年中不同季度典型月份（3月、6月、9月、12月），对当月同一时刻的表层土壤（0~5 cm）未冻水含量平均值进行日变化分析（图5）。结果表明，2020年，各覆被类型的土壤液态水含量日变化曲线几乎平行，3月和12月的土壤含水量低，日变化整体呈正弦曲线，谷值出现在北京时间10:00前后，峰值出现在18:00前后，其中3月的变化幅度更大，变化范围为0.11~0.20 $m^3·m^{-3}$，12月变化范围为0.07~0.16 $m^3·m^{-3}$。6月和9月的土壤含水量高，日变化接近直线，YG4和YG5含水量相对较高，日变化范围为0.45~0.51 $m^3·m^{-3}$，YG1、YG2和YG3含水量相对较低，日变化范围为0.21~0.32 $m^3·m^{-3}$。

2.4 不同覆被类型的土壤、植被特征

YG3处的植被盖度显著低于YG5（图6a）。YG1和YG2处的禾本科相对多度显著高于其他样地，分别为0.53和0.45（图6b）。YG4和YG5的土壤全氮、全磷和有机质含量显著高于YG1，YG2和YG3（图6d、图6e、图6h），土壤容重则相反（图6g）。地上生物量、土壤全钾和pH在各样地中差异并不显著（图6c、图6f、图6i）。

研究区粉粒>砂粒>黏粒。其中YG4和YG5粉粒含量显著高于其他样地；YG1、YG2和YG3砂粒含量显著高于其他样地（图6k、图6l）。黏粒含量占比不超过5%，且各样地间差异不显著（图6j）。

2.5 不同覆被类型下土壤含水量与环境因子的关系

Pearson相关分析表明（图7），土壤含水量与禾本科相对多度呈极显著负相关（$P<0.01$），与植被盖度、杂类草相对多度和粉粒含量呈显著正相关（$P<0.05$），与土壤容重、砂粒含量呈显著负相关（$P<0.05$）。植被盖度与地上生物量呈显著正相关（$P<0.05$）；禾本科相对多度与砂粒含量呈极显著正相关

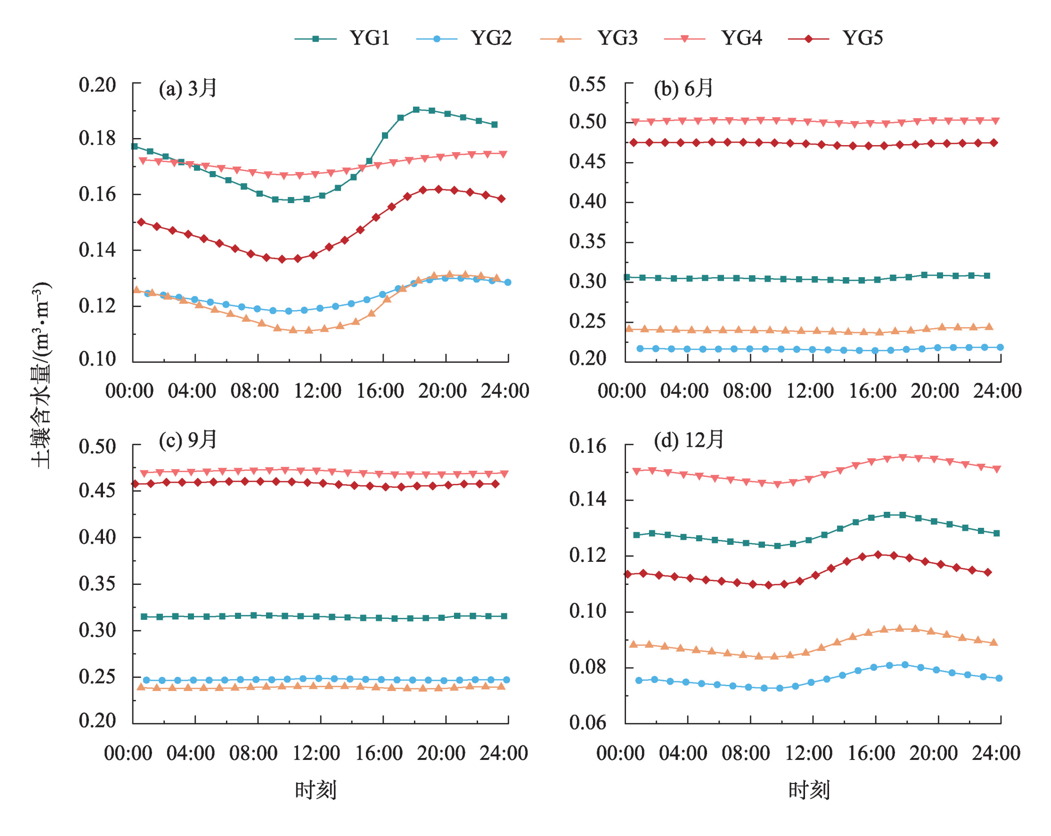
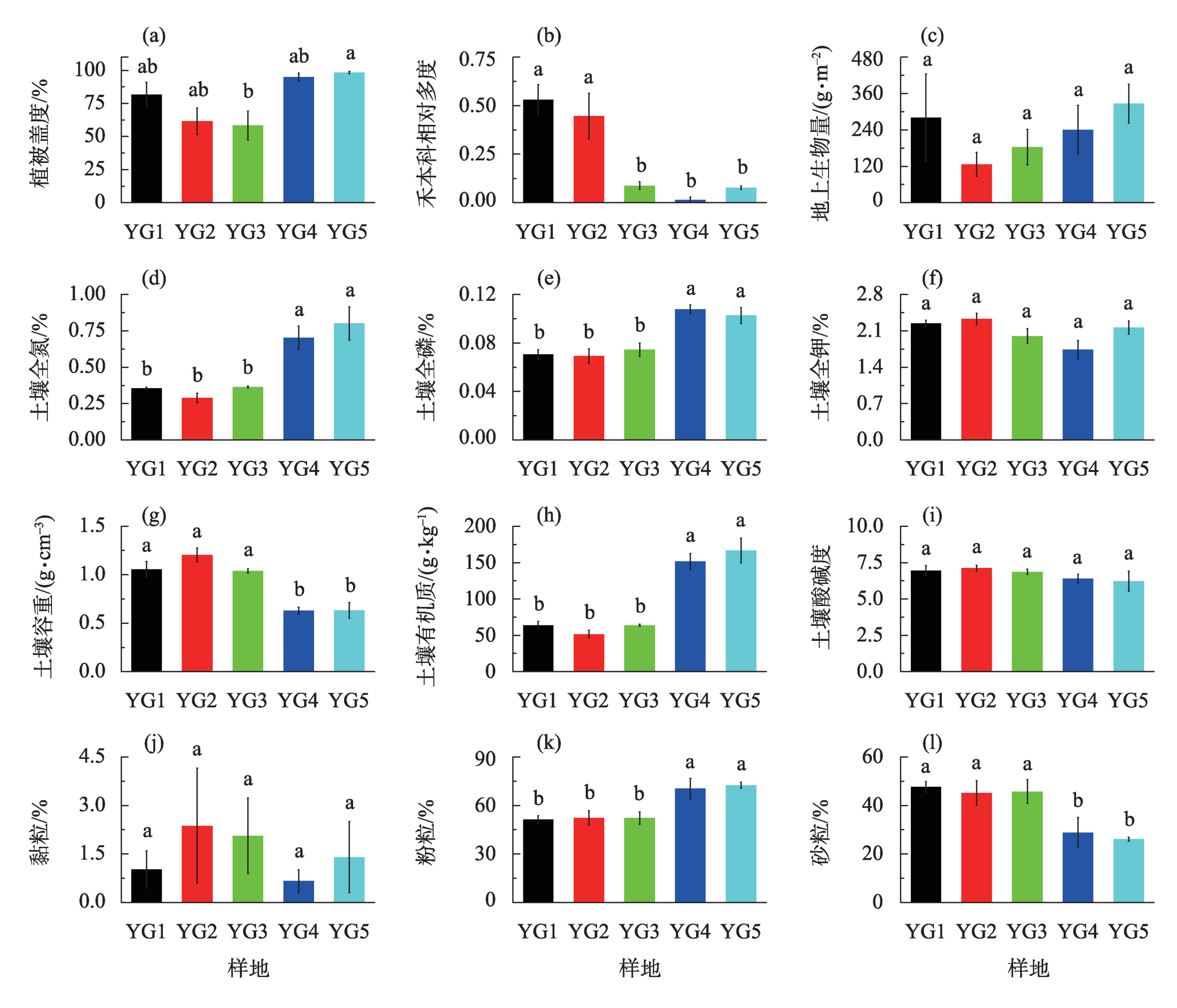


图5 2020年典型月份不同覆被类型土壤含水量日变化

Fig. 5 Daily variation of soil water content by cover type for a typical month in 2020



注：不同小写字母表示不同覆被类型各植被、土壤特征差异显著(P<0.05)。图中数据基于3 a平均值计算。

图6 不同覆被类型高寒草甸土壤与植被特征(平均值±标准误)

Fig. 6 Soil and vegetation characteristics of alpine meadows of different cover types (mean ± SE)

(P<0.01),与杂类草相对多度呈极显著负相关(P<0.01);土壤容重与pH呈极显著正相关(P<0.01),与砂粒含量呈显著正相关(P<0.05)。

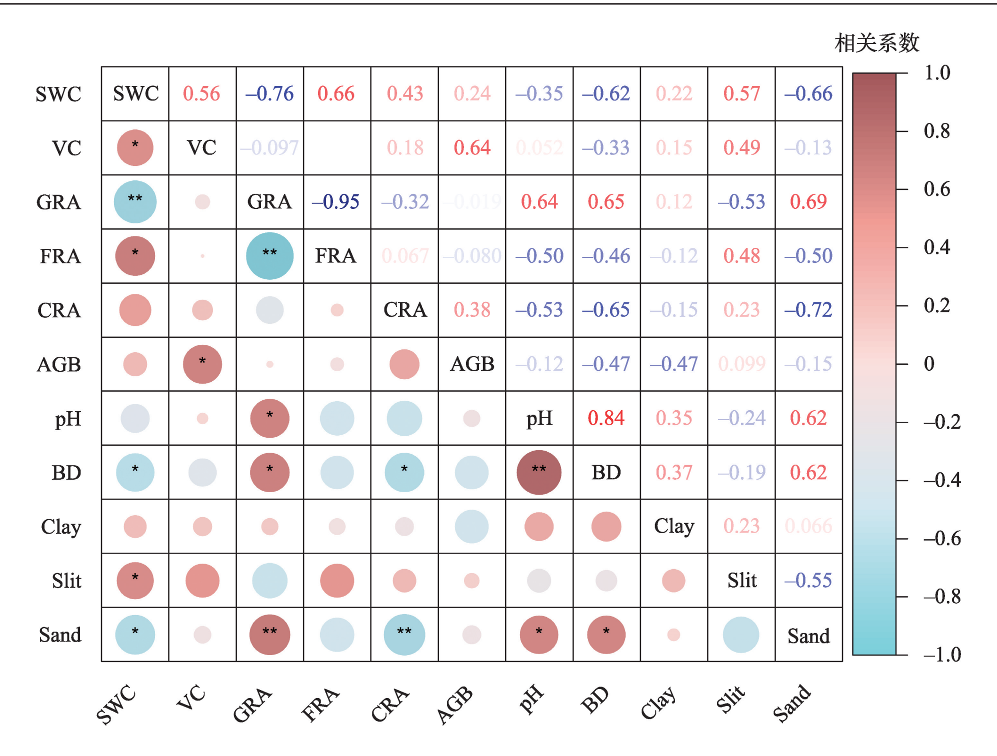
3 讨 论

3.1 土壤水分的时间动态变化

从年际尺度看,2022年三江源区高寒草甸的土壤液态水含量低于往年(图3),这可能与气候因素有关。相比于往年,2022年降雨偏少,使进入土壤的水分减少,同时气温偏高(图2),使蒸散量增加,导致该年土壤液态水含量较低。

从季节尺度看,三江源地区高寒草甸土壤液态水含量在夏秋季高于冬春季(图3)。1月或2月时,三江源地区高寒草甸土壤液态水含量最低,这可能是由于降水少且温度较低(图2),冻结水最多。4—5月冻结水开始消融,固态水转化为液态水,土壤含水量明显上升。6月冻结水完全融化,加之降水增多,土壤含水量保持较高水平,直至10月。土壤液态水含量最高值集中于6月(生长季初期)或10月(生长季末期),可能是因为生长季初期/末期气温低,且植物刚开始生长/凋落,蒸散发较小;而在生长季中期,气温较高,土壤蒸发量较大,且植被生长旺盛,需消耗大量的水分[29]。11—12月土壤中的液态水转化为固态水,含水量因而快速下降。

研究区不同时期土壤水分典型日变化也存在明显差异(图5),这可能与未冻水变化的剧烈程度有关。3月温度开始上升,土壤从表层融化,受气温影响,未冻水日变化波动剧烈;12月处于冻融期,对流旺盛,土壤未冻水日变化波动较大。因此,土壤水分在3月和12月日变幅均较大。6月和9月土壤冻结水完全消融,未冻水充足,在此期间降水较为集中,同时蒸散发也十分强烈,两者之间保持着动



注：SWC表示土壤含水量；VC表示植被盖度；GRA表示禾本科相对多度；FRA表示杂类草相对多度；CRA表示莎草科相对多度；AGB表示地上生物量；BD表示土壤容重；pH表示土壤酸碱度；Clay表示黏粒；Slit表示粉粒；Sand表示砂粒。

*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关；**表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关。

图7　土壤水分与环境因子的相关性热图

Fig. 7　Heat map of correlation between soil moisture and environmental factors

态平衡关系，土壤水分日变化因而较为微弱[30]。

3.2　不同覆被类型高寒草甸对土壤水分的影响

Pearson相关性分析结果显示，土壤理化性质与土壤含水量具有显著的相关关系（图7），表明在三江源高寒草甸，土壤特性是影响土壤水分变化的重要因素。相比于其他样地，轻中度退化高寒草甸（YG4）和原生高寒草甸（YG5）土壤养分含量较高、土壤容重较低（图6），说明YG4和YG5土壤结构疏松，透气透水性能良好，入渗能力强[31]。此外，YG4和YG5的粉粒含量高于其他样地，说明其土壤细小孔隙多，持水能力强[32-33]。因此，YG4和YG5表层的土壤含水量显著高于其他样地。其中YG4的含水量略高于YG5，这可能与YG4中的鼠兔松土作用有关[34]，鼠兔挖掘造穴活动使土壤结构疏松，提高土壤入渗能力，促进积雪融水和降水在土壤中贮存，致使土壤含水量增加[35]。深层土壤各覆被类型含水量差异显著（图4），可能是因为高覆盖的草甸（YG5）土层较厚，土壤有机质含量高，孔隙度大透气性好，同时植被对降尘和颗粒物的截留较多，土壤中粉粒的比例升高[36-37]，从而促进降水入渗，加快深层土壤对降水的响应。而植被退化较为严重的YG3，土壤结构遭到破坏，粗颗粒含量增大，容重增大，有机质含量降低，土壤入渗性能变差，深层土壤对降水的响应十分微弱[38]。YG1和YG2是禾本科人工草地，其大部分须根系都生长在土壤表层，易堵塞土壤孔隙并形成密集的根系网络，阻止土壤水分向下移动[39]，因而，深层土壤含水量低于其他样地。YG2经人工翻种后土壤相对疏松，透气透水性能略优于YG1。因此，新翻种人工草地YG2表层与深层含水量差异较小，而人工草地YG1差异较大。

除土壤特性外，植被属性也是影响土壤水分变化的重要因素。因为，植物不仅可以通过改变土壤入渗能力来改变土壤水分，还能通过蒸腾作用消耗土壤水分。YG4和YG5的土壤含水量不仅高于其他样地，同时也更加稳定，波动幅度更小（图3），这可能是由于YG4和YG5的植被盖度更高（图6a），虽然，植被蒸腾量会有所增加，但植被的遮蔽作用减少了到达地表的辐射能，能有效降低土壤水分的蒸发，削弱土壤含水量的波动幅度[40]，同时，发达的根系也有利于土壤蓄水。这与张梦迪等[6]得出的高寒

草甸蒸散量随植被盖度的增加而减小的结果一致。YG3的土壤含水量较低,这是由于黑土滩失去了植被覆盖作用,导致土壤水分蒸散、土壤可蚀性增大[41]。YG1和YG2土壤含水量较低,表明人工草地并不一定有利于土壤保水。这可能是由于人工草地能够更好地利用降水和土壤水分来提高地上生物量,对土壤水分的消耗更大[15]。此外,人工草地物种组成单一亦有可能影响土壤含水量[42]。通常,不同植物种类或功能群的养分选择、吸收物候期存在一定差异[43]。多样性高的群落有助于植物"错峰"吸收营养,且早期死亡的物种分解后所释放的养分能及时供应于其他植物。这有利于减少养分淋失,促进生态系统物质循环,进而提高土壤肥力[44]。本研究区人工草地多为垂穗披碱草单播,物种组成简单,因而,可能造成养分利用单一,导致土壤质量下降[45]、多功能性降低[46]而不利于保水。土壤水分与禾本科相对多度的负相关关系也证实了这一点(图7)。

3.3 高寒草甸土壤水分管理建议

土壤水分特征由环境因素决定[47],因此,通过土壤改良、植被管理等措施可有效控制水分供应,保持水分平衡。土壤改良是提高土壤保水能力的主要方法之一,增施有机肥和生物肥、提高土壤养分含量能有效改良土壤结构[48],进而提高土壤持水能力,促进土壤养分循环和植物生长。此外,适时进行翻耕操作,能够提高土壤孔隙度,降低土壤容重,增加土壤含水量,有利于植物的生长和根系的发育[49]。植被覆盖也有利于土壤保水,建植人工草地是增加植被覆盖、提高牧草产量,解决草畜矛盾[50],实现高寒地区生态草牧业可持续发展的重要举措。然而,单一草种种植难以同时满足生态与生产需求[51]。因此,三江源区建植人工草地需根据退化情况以及环境条件,定制适宜的人工草地建植牧草品种与混播比例[52],并加强后期管理,如翻种、补播[53]等。同时适度放牧以及合理的牧草种植密度也有利于土壤水分的增加[54]。因为,更高的植物生产力和水分利用效率意味着更多的土壤水分消耗,草地生产力过高时也会导致土壤水分亏缺[29]。因此,在退化草地恢复过程中,需要寻求草地生产力与土壤水分之间的平衡,当草地恢复接近原始状态,草地密度较高时,可以进行适度放牧,控制牧草密度。

4 结 论

本文运用2019—2022年三江源区高寒草甸土壤液态水含量数据,比较不同覆被类型高寒草甸土壤水分的差异,分析其动态变化特征及影响因素,主要结论如下:

(1) 土壤水分变化主要受温度与降水影响。由于2022年降雨偏少且气温偏高,各样地土壤水含量下降了1%~18%;冬春季降水少且温度低,液态水含量低于夏秋季;3月和12月分别为土壤水融化期和冻融期,液态水含量日变化波动较大。

(2) 土壤和植被特征是影响不同覆被类型高寒草甸土壤水分差异的主要因素。不同覆被类型中,轻中度退化草地和原生高寒草甸的植被覆盖度、土壤养分和粉粒含量较高、容重较低,土壤含水量较高且更稳定。

(3) 禾本科人工草地并不利于土壤保水。禾本科草地根系密集,易堵塞土壤孔隙,影响水分下渗;同时人工草地能够消耗更多的土壤水分来提高地上生物量;此外,人工草地物种组成单一可能造成养分利用单一,导致土壤质量下降。

(4) 土壤改良和植被管理是提高土壤保水能力的重要手段。增施肥料、适时翻耕等土壤改良措施和定制适宜混播比例、适度放牧控制牧草密度等植被管理措施可有效控制水分供应,提高土壤水分。

参考文献(References):

[1] Su B Q, Shangguan Z P. Decline in soil moisture due to vegetation restoration on the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(3): 290-299.

[2] Liu X, Feng X, Fu B. Changes in global terrestrial ecosystem water use efficiency are closely related to soil moisture[J]. Science of the Total Environment, 2020, 698: 134165.

[3] Bogena H R, Huisman J A, Baatz R, et al. Accuracy of the cosmic-ray soil water content probe in humid forest ecosystems: The worst case scenario[J]. Water Resources Research, 2013, 49(9): 5778-5791.

[4] 范明彦, 田丽慧, 周海. 微地形对高寒固沙植物水分利用特征的影响[J]. 干旱区研究, 2024, 41(1): 60-70. [Fan Mingyan, Tian Lihui, Zhou Hai. Effects of micro-topography on water use characteristics of alpine sand-fixing plants[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(1): 60-70.]

[5] Vereecken H, Huisman J A, Pachepsky Y, et al. On the spatio-tem-

poral dynamics of soil moisture at the field scale[J]. Journal of Hydrology, 2014, 516: 76-96.

[6] 张梦迪, 张立锋, 陈之光, 等. 土壤蒸发和植被蒸腾对三江源退化高寒草甸蒸散的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(18): 7138-7152. [Zhang Mengdi, Zhang Lifeng, Chen Zhiguang, et al. Effects of evaporation and transpiration on evapotranspiration of degraded meadow in the Three-River Source Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7138-7152.]

[7] 赵文, 尹亚丽, 李世雄, 等. 三江源区退化高寒草甸土壤真菌群落特征[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 869-877. [Zhao Wen, Yin Yali, Li Shixiong, et al. The characteristics of soil fungal community in degraded alpine meadow in the Three Rivers Source Region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 869-877.]

[8] Tian L, Zhang Y J, Zhu J T. Decreased surface albedo driven by denser vegetation on the Tibetan Plateau[J]. Enviromental Research Letters, 2014, 9(10): 104001.

[9] Li X L, Gao J, Brierley G, et al. Rangeland degradation on the Qinghai-Tibet Plateau: Implications for rehabilitation[J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(1): 72-80.

[10] 张宇恒, 张莉, 张秀娟, 等. 退化程度对玛沁高寒草甸植物群落及土壤持水能力的影响[J]. 草业科学, 2022, 39(2): 235-246. [Zhang Yuheng, Zhang Li, Zhang Xiujuan, et al. Effects of degradation degree on plant communities and soil water holding capacity of Maqin alpine meadow[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(2): 235-246.]

[11] Zucco G, Brocca L, Moramarco T, et al. Influence of land use on soil moisture spatial-temporal variability and monitoring[J]. Journal of Hydrology, 2014, 516: 193-199.

[12] An W M, Li Z S, Wang S, et al. Exploring the effects of the “Grain for Green” program on the differences in soil water in the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Ecological Engineering, 2017, 107: 144-151.

[13] Na L, Na R, Bao Y, et al. Time-lagged correlation between soil moisture and intra-annual dynamics of vegetation on the Mongolian Plateau[J]. Remote Sensing, 2021, 13(8): 1527.

[14] 尚占环, 董全民, 施建军, 等. 青藏高原“黑土滩”退化草地及其生态恢复近10年研究进展——兼论三江源生态恢复问题[J]. 草地学报, 2018, 26(1): 1-21. [Shang Zhanhuan, Dong Quanmin, Shi Jianjun, et al. Research progress in recent ten years of ecological restoration for “Black Soil Land”degraded grassland on Tibetan Plateau-concurrently discuss of ecological restoration in Sangjiangyuan region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(1): 1-21.]

[15] 李代琼, 姜峻, 梁一民, 等. 安塞黄土丘陵区人工草地水分有效利用研究[J]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 66-74. [Li Daiqiong, Jiang Jun, Liang Yimin, et al. Study on water use efficiency of the artificial grassland at Ansai County in the Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1996, 3(2): 66-74.]

[16] 程积民, 万惠娥, 王静. 黄土丘陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 435-438. [Cheng Jimin, Wan Hui’e, Wang Jing. Alfalfa growth and its relation with soil water status in loess hilly and gully region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(3): 435-438.]

[17] Cheng M L, Zhong L, Ma Y M, et al. A study on the assessment of multi-source satellite soil moisture products and reanalysis data for the Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing, 2019, 11(10): 1196.

[18] Zeng J Y, Shi P F, Chen K S, et al. Assessment and error analysis of satellite soil moisture products over the Third Pole[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-18.

[19] 程梦园, 曹广超, 赵美亮, 等. 香日德-柴达木河流域土壤湿度时空变化特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 615-624. [Cheng Mengyuan, Cao Guangchao, Zhao Meiliang, et al. Temporal and spatial variation characteristics and influencial factors of soil moisture in the Xiangride-Qaidam River Basin[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 615-624.]

[20] Su Z, de Rosnay P, Wen J, et al. Evaluation of ECMWF’s soil moisture analyses using observations on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research-atmospheres, 2013, 118(11): 5304-5318.

[21] Li H Y, Xiao Z N, Wei J H, et al. The seasonal and diurnal variation characteristics of soil moisture at different depths from observational sites over the Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing, 2022, 14(19): 5010.

[22] Si M K, Guo X W, Lan Y T, et al. Effects of climatic variability on soil water content in an alpine Kobresia meadow, Northern Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Water, 2022, 14(17): 2754.

[23] 石明明, 王晓敏, 陈奇, 等. 高寒草地干湿生态系统土壤水分及入渗对降水的响应[J]. 草业学报, 2021, 30(12): 49-58. [Shi Mingming, Wang Xiaomin, Chen Qi, et al. Responses of soil moisture to precipitation and infiltration in dry and wet alpine grassland ecosystems[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(12): 49-58.]

[24] 马玉寿, 郎百宁, 李青云, 等. 江河源区高寒草甸退化草地恢复与重建技术研究[J]. 草业科学, 2002, 19(9): 1-5. [Ma Yushou, Lang Baining, Li Qingyun, et al. Study on rehabilitating and rebuilding technologies for degenerated alpine meadow in the Changjiang and Yellow River Source Region[J]. Pratacultural Science, 2002, 19(9): 1-5.]

[25] 王启基, 张松林. 天然垂穗披碱草种群生长节律及生态适应性的研究[J]. 中国草地, 1990, 12(1): 18-25. [Wang Qiji, Zhang Songlin. A study on growth rhythm and ecological adaptability of natural *Elymus nutans* population[J]. Chinese Journal of Grassland, 1990, 12(1): 18-25.]

[26] 孙吉雄. 草坪学[M]. 北京：中国农业出版社, 1995. [Sun Jixiong. Turf Science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995.]

[27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京：中国农业出版社, 2000. [Bao Shidan. Soil Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.]

[28] 宛倩, 王杰, 王向涛, 等. 青藏高原不同草地利用方式对土壤粒径分形特征的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1716-1726. [Wan Qian, Wang Jie, Wang Xiangtao, et al. Effects of different meadow use types on the fractal characteristics of soil particle in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5):

1716-1726.]

[29] 黄泽. 黄土高原半干旱区典型人工草地与天然草地土壤水分平衡研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018. [Huang Ze. Soil Water Balanc of Typical Artificial and Natural Grasslands in The Semi-Arid Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.]

[30] 马晶晶, 王佩, 邓钰婧, 等. 青海湖流域高寒草甸季节冻土土壤温湿变化特征[J]. 土壤, 2022, 54(3): 619-628. [Ma Jingjing, Wang Pei, Deng Yujing, et al. Characteristics of seasonal frozen soil temperature and moisture changes in alpine meadow in Qinghai Lake watershed[J]. Soils, 2022, 54(3): 619-628.]

[31] 杨馥铖, 刘昌义, 胡夏嵩, 等. 黄河源区不同退化程度高寒草地理化性质及复合体抗剪强度研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 560-571. [Yang Fucheng, Liu Changyi, Hu Xiasong, et al. Study on physical and chemical properties and shear strength characteristics of root-soil composite system with different degradation degrees of alpine grassland in the source region of the Yellow River [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 560-571.]

[32] Gao Y, He Z, Zhu X, et al. Light thinning can improve soil water availability and water holding capacity of plantations in alpine mountains[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 1032057.

[33] 李军豪, 杨国靖, 王少平. 青藏高原区退化高寒草甸植被和土壤特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(6): 2109-2118. [Li Junhao, Yang Guojing, Wang Shaoping. Vegetation and soil characteristics of degraded alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau, China: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6): 2109-2118.]

[34] 黄倩, 丁明军, 陈利文, 等. 三江源区不同退化程度高寒草甸表土层的土壤水分变化特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 189-195. [Huang Qian, Ding Mingjun, Chen Liwen, et al. Variations of moisture in surface soil of alpine meadow with different degradation degrees in the Three-River Source Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 189-195.]

[35] 杨嘉仪, 赵广举, 穆兴民, 等. 高寒草地鼠兔干扰下不同地表类型的土壤属性特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(3): 115-120. [Yang Jiayi, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Soil properties of different surface types disturbed by plateau pika in alpine meadow [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(3): 115-120.]

[36] 文海燕, 赵哈林, 傅华. 开垦和封育年限对退化沙质草地土壤性状的影响[J]. 草业学报, 2005, 14(1): 31-37. [Wen Haiyan, Zhao Halin, Fu Hua. Effects of years for reclamation and enclosure years on soil properties of degraded sandy grassland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2005, 14(1): 31-37.]

[37] 宋成刚, 张铭洋, 何琦, 等. 禁牧封育对祁连山南麓高寒草甸植被群落结构及土壤水分特征的影响[J]. 中国草地学报, 2023, 45(4): 22-32. [Song Chenggang, Zhang Mingyang, He Qi, et al. Effects of grazing prohibition on vegetation community structure and soil moisture characteristics of alpine meadows on the southern slope of the Qilian Mountains[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(4): 22-32.]

[38] 柴雯, 王根绪, 李元寿, 等. 长江源区不同植被覆盖下土壤水分对降水的响应[J]. 冰川冻土, 2008, 30(2): 329-337. [Chai Wen, Wang Genxu, Li Yuanshou, et al. Response of soil moisture under different vegetation coverage to precipitation in the headwaters of the Yangtze River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(2): 329-337.]

[39] Archer N, Quinton J N, Hess T M. Below-ground relationships of soil texture, roots and hydraulic conductivity in two-phase mosaic vegetation in South-east Spain[J]. Journal of Arid Environments, 2002, 52(4): 535-553.

[40] 单小琴, 郑秀清. 地表覆盖对季节性冻融期土壤水分特征的影响[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 99-103. [Shan Xiaoqin, Zheng Xiuqing. Impacts of surface covering on soil water characteristics during seasonal freeze-thaw period[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(7): 99-103.]

[41] 魏茂宏, 林慧龙, 王钊齐. 江河源区高寒草甸退化序列秃斑热岛效应研究[J]. 中国草地学报, 2015, 37(1): 22-29. [Wei Maohong, Lin Huilong, Wang Zhaoqi. Study on the "Heat lsland Effect" of barren patch on degradation sequences of alpine meadow in the source region of the Yangtze and Yellow River, Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Chinese Journal of Grassland, 2015, 37(1): 22-29.]

[42] Liu Y, Miao H T, Chang X F, et al. Higher species diversity improves soil water infiltration capacity by increasing soil organic matter content in semiarid grasslands[J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(13): 1599-1606.

[43] Zhang Z S, Song X L, Lu X G, et al. Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in estuarine wetland soils: influences of vegetation coverage, plant communities, geomorphology, and seawalls[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(6): 1043-1051.

[44] Fornara D A, Tilman D. Ecological mechanisms associated with the positive diversity-productivity relationship in an N-limited grassland[J]. Ecology, 2009, 90(2): 408-418.

[45] 李文, 魏廷虎, 永措巴占, 等. 混播比例对三江源人工草地植被和土壤养分特征的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(12): 39-48. [Li Wen, Wei Tinghu, Yongcuobazhan, et al. Effects of different mixed planting ratios on vegetation and soil characteristics of sown pasture in the Sanjiangyuan Region[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(12): 39-48.]

[46] Chen K, Zhou H, Lu B, et al. Single-species artificial grasslands decrease soil multifunctionality in a temperate steppe on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Agronomy-basel, 2021, 11: 2092.

[47] Qiu Y, Fu B, Wang J, et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Environments, 2001, 49(4): 723-750.

[48] Li R, Tao R, Ling N, et al. Chemical, organic and bio-fertilizer management practices effect on soil physicochemical property and antagonistic bacteria abundance of a cotton field: Implications for

soil biological quality[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 167: 30-38.

[49] 蒲境, 史东梅, 娄义宝, 等. 不同耕作深度对红壤坡耕地耕层土壤特性的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 8-14. [Pu Jing, Shi Dongmei, Lou Yibao, et al. Effect of different tillage depth on soil properties of ploughing layer in slope cultivated land of red soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 8-14.]

[50] 段呈, 石培礼, 张宪洲, 等. 藏北高原牧区人工草地建设布局的适宜性分析[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5517-5526. [Duan Cheng, Shi Peili, Zhang Xianzhou, et al. Suitability analysis for sown pasture planning in an alpine rangeland of the northern Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5517-5526.]

[51] Lamb E G, Kennedy N, Siciliano S D. Effects of plant species richness and evenness on soil microbial community diversity and function[J]. Plant and Soil, 2011, 338(1): 483-495.

[52] 张小芳, 张春平, 董全民, 等. 三江源区高寒混播草地群落结构特征的研究[J]. 草地学报, 2020, 28(4): 1090-1099. [Zhang Xiaofang, Zhang Chunping, Dong Quanmin, et al. Study on plant community structure characteristics of alpine mixed-seeding grassland in Three Rivers Source Regions[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28 (4): 1090-1099.]

[53] 张海娟, 周学丽, 芦光新, 等. 有机肥与补播对退化人工草地植被与土壤的影响[J]. 中国草地学报, 2023, 45(2): 67-75. [Zhang Haijuan, Zhou Xueli, Lu Guangxin, et al. Effect of organic fertilizer and reseeding on vegetation and soil in degraded artificial grassland[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(2): 67-75.]

[54] 宝音, 王忠武, 阿拉塔. 放牧对草地土壤水分的影响[J]. 当代畜禽养殖业, 2009, 29(5): 11-13. [Bao Yin, Wang Zhongwu, Alata. Effects of grazing on soil moisture in grassland[J]. Modern Animal Husbandry, 2009, 29(5): 11-13.]

Soil moisture variation characteristics of alpine meadow with different cover types in the Three-River Source Region

WAN Jiayi[1], SHI Jiayu[1,2], ZHANG Huamin[3], LI Lanhui[4], DING Mingjun[1,2]

(1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, Jiangxi, China; 2. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Nanchang 330022, Jiangxi, China; 3. Center for Natural Resources Policy Survey and Evaluation of Jiangxi Province, Nanchang 330025, Jiangxi, China; 4. School of Computer and Information Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, Fujian, China)

Abstract: Soil moisture is the material foundation for plant growth and reproduction; therefore, understanding its dynamic properties is critical for local water management and vegetation restoration. The study area of this research was the alpine meadows in the Three-River Source Region, and the study combined field surveys and laboratory experiments to analyze the annual, seasonal, and daily dynamic characteristics of soil moisture in alpine meadows under different cover types and explore the influence of vegetation and soil factors on soil moisture changes. The findings revealed that: (1) In 2022, when there was less rainfall and temperatures were higher, the soil liquid water content in different areas decreased by 1% to 18% compared with previous years; the soil unfrozen water content was higher in summer and fall than in winter and spring; and the highest monthly average water content of various sites occurred in October (0.495 $m^3 \cdot m^{-3}$) and the lowest value was in January (0.038 $m^3 \cdot m^{-3}$); the daily variations in the soil liquid water content in March and December were larger, ranging from 0.11 to 0.20 $m^3 \cdot m^{-3}$ and 0.07 to 0.16 $m^3 \cdot m^{-3}$, respectively. (2) Mildly and highly degraded alpine meadows (YG4) and native alpine meadows (YG5) have greater vegetation cover and lower bulk density, resulting in greater soil water content and less variance. (3) Artificial grassland did not promote soil water retention owing to its high water consumption, single species, and low soil fertility. The results of the study can provide a reference for the restoration and management of alpine meadow ecosystem in the Three-River Source Region.

Keywords: vegetation coverage; soil moisture content; degradation;artificial grassland; Three-River Source Region